

УДК 664.66

DETERMINATION OF THE RATIONAL DESIGN OF A VACUUM CHAMBER OF A DEVICE FOR VACUUM COOLING OF BAKERY PRODUCTS UNDER CONTINUOUS PRODUCTION CONDITIONS

O. Kozak, M. Desyk, V. Telychkun*National University of Food Technologies***Key words:**

apparatus,
vacuum chamber,
sealing,
simulation modeling

Article history:

Received 02.04.2025
Received in revised form
22.04.2025
Accepted 24.04.2025

Corresponding author:

oleksandrkozak2@gmail.com

ABSTRACT

The article addresses the issue of improving the design of the vacuum chamber of a vacuum cooling apparatus for bakery products in continuous-flow production conditions. The relevance of the study is driven by the need to reduce the cooling time of baked goods after baking in order to lower energy consumption and enhance the quality of the final products. Modern approaches to organizing the cooling process in the baking industry are analyzed, particularly the use of vacuum cooling methods, which significantly reduce the cooling duration while preserving the porous structure and organoleptic properties of the products.

The aim of the study is to determine a rational design of the vacuum chamber, taking into account real operating conditions, ensuring the tightness of joints, sufficient structural strength, and optimal placement of bakery products during cooling. Geometrical and design calculations were performed to justify the shape and dimensions of the vacuum chamber. In particular, the required contact area of the sealing with the vacuum chamber was determined to ensure airtightness under a vacuum pressure of 4 kPa. It was established that the minimum contact area should be no less than 0.0389 m².

Using SOLIDWORKS Simulation software, a stress-strain analysis of the vacuum chamber design was carried out. The simulation considered the influence of external atmospheric pressure on the vacuum chamber walls and the compressive force acting on the chamber's seal. The simulation results confirmed that the maximum stress values do not exceed the allowable limits for the selected material (stainless steel AISI 316L), and the structural deformations remain within acceptable limits.

The developed design ensures sufficient rigidity, airtightness, and manufacturability, confirming its suitability for use in continuous production environments. The obtained results can be used for further optimization of energy consumption and reduction of the vacuum cooling time of bakery products.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-19

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ БУДОВИ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ АПАРАТА ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ПОТОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

О. С. Козак, аспірант, ORCID-ID: 0009-0004-7112-6302

М. Г. Десик, канд. техн. наук, ORCID-ID: 0000-0001-8016-466X

В. І. Теличкун, канд. техн. наук, ORCID-ID: 0000-0002-3132-6447

Національний університет харчових технологій

У статті представлено результати визначення раціональної конструкції вакуумної камери для охолодження батона (0,5 кг) в потоковому виробництві. За допомогою SOLIDWORKS Simulation проведено перевірку напружень і деформацій різних варіантів конструкції.

Визначено, що для герметичності та довговічності вузла вакуумування площа контакту з ущільненням має бути $\geq 0,0389 \text{ м}^2$. З урахуванням геометричних параметрів батона та потреби одночасного охолодження чотирьох батонів за допомогою імітаційного моделювання визначено раціональну будову вакуумної камери апарата.

Ключові слова: апарат, вакуумна камера, ущільнення, імітаційне моделювання.

Вступ. Охолодження є завершальним і найдовшим етапом виробництва хлібобулочних виробів, тому останнім часом особливу увагу приділяють оптимізації цього процесу, оскільки він є ключовим для забезпечення якості виробів [1, 9, 13]. Охолодження впливає на структуру, смакові властивості та мікробіологічну безпеку виробів, тому активно проводяться дослідження, спрямовані на зменшення енергетичних витрат, скорочення часу охолодження та поліпшення якості продукції через впровадження новітніх способів охолодження [12].

На хлібопекарських виробництвах використовують три способи охолодження хлібобулочних виробів: природне (конвективне), охолодження за допомогою кондиціонованого повітря та вакуумне охолодження [9].

Природний (конвективний) спосіб охолодження є найпростішим та найдешевшим, але потребує багато часу, великих виробничих площ і не забезпечує рівномірного охолодження, що може вплинути на якість готової продукції [8]. Охолодження за допомогою кондиціонованого повітря зменшує час охолодження, однак вимагає використання складного обладнання, потребує значних енергетичних витрат і дотримання параметрів робочого повітря [7].

Одним із перспективних напрямків інтенсифікації процесу охолодження хлібобулочних виробів є використання вакуумного охолодження, яке базується на відведенні тепла через випаровування вологи з продуктів з достатньою газо- та паропроникністю [6]. Цей спосіб дає змогу значно зменшити час охолодження, забезпечуючи рівномірний розподіл температури всередині виробу, що позитивно впливає на його якість. Вакуумне охолодження також покращує структурно-механічні властивості, подовжує термін зберігання і знижує ризик мікробіологічного забруднення [5].

Однак вакуумний спосіб охолодження хлібобулочних виробів наразі не реалізований в умовах потокового виробництва, через що виникає необхідність у розробці апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового

виробництва [12—14]. Розроблену схему розміщення конструктивних елементів апарата представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схема розміщення конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

Ключовим і найбільш навантаженим вузлом цього апарата (рис. 1) є вузол вакуумування, який складається з вакуумної камери ущільнення та столика вакуумування. Для забезпечення герметичності та довговічності вузла вакуумування необхідно провести дослідження з визначення раціональної будови вакуумної камери, яка відповідатиме умовам експлуатації апарата.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Останніми часом дослідники значну увагу приділяють оптимізації процесу охолодження хлібобулочних виробів, оскільки цей етап є ключовим для забезпечення високої якості та безпеки готової продукції. Оптимізація процесу сприятиме підвищенню ефективності виробництва хлібобулочних виробів [7, 12]. Охолодження — важливий завершальний етап, який впливає на структуру, смакові властивості та мікробіологічну безпеку продукції [9], тому активно проводяться дослідження, спрямовані на зменшення енергетичних витрат, скорочення часу охолодження та покращення якості продукції за допомогою впровадження новітніх способів охолодження [6].

З огляду на необхідність удосконалення традиційних методів охолодження (природного та охолодження кондиціонованим повітрям) дослідники звертаються до інноваційних підходів, серед яких вакуумне охолодження займає одну з провідних позицій [5, 10, 12]. Проведені дослідження демонструють, що вакуумне охолодження має значні переваги, серед яких: скорочення часу охолодження з кількох годин до хвилин, покращення структурно-механічних властивостей виробів та зниження ризику мікробіологічного забруднення [13]. Однак вакуумний спосіб охолодження досі не впроваджений у умовах потокового виробництва.

Сучасні дослідження орієнтовані на вдосконалення існуючих способів охолодження та пошук нових, інноваційних технологій, зокрема вакуумного охолодження [6]. Ця технологія має великий потенціал для значного підвищення ефективності процесу охолодження хлібобулочних виробів і може стати перспективною альтернативою традиційним способам охолодження. Завдяки своїм численним перевагам вакуумне охолодження може стати основою для створення більш енергоефективного й економічного обладнання, що інтенсифікує виробничі процеси в хлібопекарській промисловості [10, 11].

Мета досліджень: визначення раціональної будови вакуумної камери, яка відповідатиме умовам експлуатації та забезпечить безперебійну роботу апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва для батона з пшеничного борошна вищого гатунку масою 0,5 кг.

Матеріали і методи. При розробці обладнання необхідно перевіряти найбільш навантажені конструктивні елементи [15]. Для забезпечення безперебійної роботи потрібно обирати матеріали з допуском до контакту з харчовими продуктами, які забезпечують міцність, герметичність і не впливають на якість продукції. Також слід провести випробування елементів на міцність і деформацію для забезпечення їх надійності в експлуатації [15].

Для точного аналізу міцності та деформації конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження було проведено чисельне моделювання за допомогою програмного середовища SOLIDWORKS Simulation. Це середовище дає змогу детально досліджувати механічну поведінку конструкцій під різними навантаженнями, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ) для розв'язання задач, пов'язаних з міцністю, деформацією, тепловими та іншими фізичними процесами в матеріалах [11, 15].

Методика дослідження конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження на міцність і деформацію за допомогою середовища SOLIDWORKS Simulation:

1. Створення 3D-моделей конструктивних елементів.

Першим кроком є створення тривимірних моделей конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження. Компоненти проектуються відповідно до реальних розмірів і конфігурацій, з точним моделюванням геометрії кожного елемента за допомогою інструментів SOLIDWORKS, що дає змогу застосовувати ефективні методи аналізу й оцінки міцності [11, 15].

2. Вибір матеріалів і фізичних властивостей.

Для кожного конструктивного елемента визначаються матеріали, що використовуються в реальній конструкції апарата для вакуумного охолодження. Ураховуються фізичні характеристики матеріалів, такі як модуль пружності, межа міцності, коефіцієнт теплового розширення та в'язкості, що важливі для коректного моделювання поведінки матеріалу під навантаженням і забезпечують точність розрахунків [15].

Для ущільнення обрано силіконову гуму, EPDM 50-60 Shore A, що є оптимальним вибором завдяки стійкості до температур, вологи, хімічних впливів і відповідності міжнародним стандартам. Для вакуумної камери обрано матеріалом сталь AISI 316L, яка має високу корозійну стійкість і міцність, з товщиною стінки 3 мм.

3. Визначення навантажень і граничних умов.

Для коректного моделювання визначено фактичні навантаження на конструктивні елементи за допомогою розподіленого тиску. Граничні умови враховували реальні контакти між елементами конструкції [15].

4. Запуск симуляції.

Після попередніх кроків запускається симуляція, під час якої модель піддається навантаженню за заданими умовами. SOLIDWORKS Simulation використовує метод скінченних елементів для розподілу навантажень і розрахунку їх впливу на міцність і деформацію. Аналіз змін напружень і деформацій дає змогу виявити критичні зони, що можуть призвести до пошкоджень або несправностей [15].

5. Аналіз результатів моделювання.

Після моделювання результати дають змогу проаналізувати розподіл напружень і деформацій, виявити зони з найбільшими напруженнями, що можуть призвести до пошкоджень або зношування матеріалів. Особлива увага приділяється «гарячим точкам» — ділянкам з максимальними напруженнями, що допомагає визначити місця для посилення конструкції чи зміни матеріалів для підвищення надійності [11, 15].

6. Оптимізація конструкції.

На основі аналізу результатів моделювання вносяться необхідні зміни, такі як коригування геометрії елементів і посилення певних частин конструкції. Оптимізація конструкції дає змогу досягти балансу між міцністю, вагою та витратою матеріалів, що є важливим при розробці обладнання [15].

Результати досліджень. Визначення площі контакту вакуумної камери з ущільненням. Для забезпечення ефективної роботи вузла вакуумування і довговічності його роботи необхідно правильно підібрати площу контакту вакуумної камери з ущільненням. Для цього був зроблений розрахунок, щоб уникнути руйнування гуми і забезпечити належний рівень герметичності в системі.

З огляду на те, що у вакуумній камері буде створюватись розрідження до 4 кПа на вакуумну камеру і, відповідно, на ущільнення буде діяти зовнішній тиск 97,352 кПа, виконано розрахунок необхідної площі контакту ущільнення з вакуумною камерою [12].

Розрахунок проводиться за формулою напруги стиску [15]:

$$\sigma_c = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

де σ_c — напруження, Па; P — сила стискання, Па; F — площа поперечного перерізу, м².

Звідси:

$$F = \frac{P}{\sigma_c}. \quad (2)$$

Межу міцності на стиск приймаємо $[\sigma_c] = 5 \text{ МПа} = 5\,000\,000 \text{ Па}$, оскільки коефіцієнт запасу міцності (КЗМ) для еластомерів, таких як EPDM (етилен-пропіленовий каучук), може варіюватися залежно від конкретних умов експлуатації, включаючи температуру, навантаження й тривалість впливу, що зазвичай, коливається в межах від 2 до 4, то межа міцності на стиск буде $\sigma_c = \frac{5\,000\,000}{2} = 2\,500\,000 \text{ Па}$.

Розраховуємо площу контакту вакуумної камери з ущільненням [15]:

$$F = \frac{97352}{2\,500\,000} = 0,0389 \text{ м}^2. \quad (3)$$

На рис. 2 зображено область контакту вакуумної камери з ущільненням, враховуючи необхідні розміри для розміщення в середині 4 батонів.

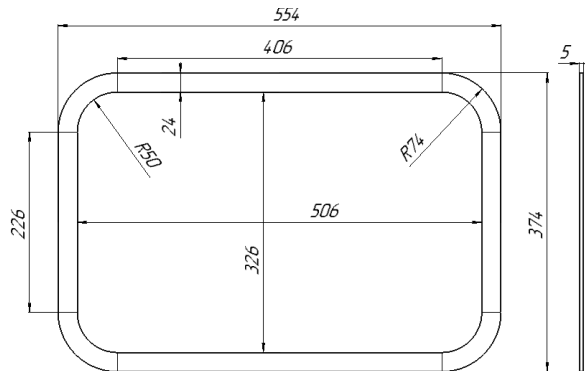


Рис. 2. Область контакту вакуумної камери з ущільненням

Розрахуємо площу поверхні ділянки контакту вакуумної камери з ущільненням:

$$F_1 = (0,406 \cdot 0,024) \cdot 2 = 0,019488 \text{ м}^2; \quad (4)$$

$$F_2 = (0,23 \cdot 0,01) \cdot 2 = 0,010848 \text{ м}^2; \quad (5)$$

$$F_3 = (\pi \cdot 0,06^2) - (\pi \cdot 0,05^2) = 0,009345 \text{ м}^2; \quad (6)$$

$$F = 0,019488 + 0,010848 + 0,009345 = 0,039681 \text{ м}^2. \quad (7)$$

Проводимо перевірку розрахунків гуми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS, креслення гуми наведено на рис. 3.



Рис. 3. 3Д креслення профіля гуми, над яким проводилися моделювання

На рис. 4 зображено схему прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS.

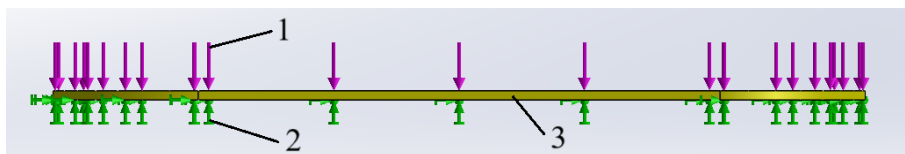


Рис. 4. Схема прикладення навантаження та фіксація моделі у просторі в середовищі SOLIDWORKS: 1 — зображення прикладеного навантаження в 97325 Па; 2 — зображення жорсткої фіксації площини в просторі; 3 — профіль вакуумної гуми EPDM

Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 5.

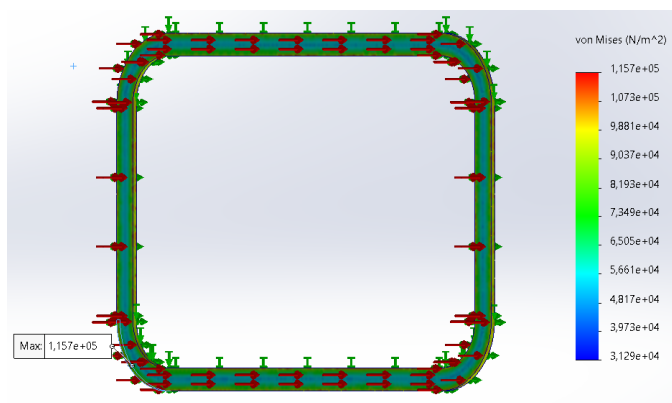


Рис. 5. Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

За результатами проведеного моделювання максимальне навантаження становить $\sigma_{max} = 1,157 \cdot 10^5$ Па. Перевіряємо умову міцності матеріалу: $\sigma_c \geq \sigma_{max} - 2,5 \cdot 10^6 > 1,157 \cdot 10^5$. Отже, умова міцності виконується.

Обрана марка гуми, розрахована площа контакту та розроблена 3Д модель ущільнення задовольняють умови експлуатації.

Визначення раціональної будови вакуумної камери. Марка сталі яка використовується для виготовлення вакуумної камери AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2). Враховуючи геометричні параметри ділянки контакту вакуумної камери з ущільненням, визначимо оптимальну будову вакуумної камери шляхом проведення перевірки на міцність та деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS.

На рис. 6 зображено креслення вакуумної камери простої форми.

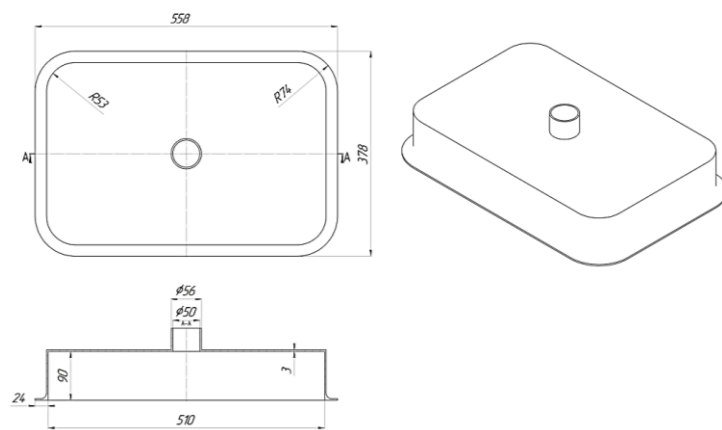


Рис. 6. Креслення вакуумної камери простої форми

З метою визначення критичних зон напруги та деформації проведемо дослідження в середовищі SOLIDWORKS Simulation.

Схему прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS зображено на рис. 7.

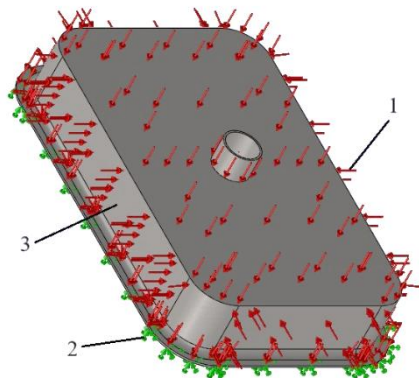


Рис. 7. Схема прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS: 1 — зображення прикладеного навантаження в 97325 Па; 2 — зображення жорсткої фіксації площини в просторі; 3 — вакуумна камера

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 8.

За результатами проведеного моделювання (рис. 8) максимальне навантаження становить $\sigma_{max} = 3,855 \cdot 10^8$ Па. Перевіряємо умову міцності матеріалу: $\sigma_c \geq \sigma_{max}$ — $6 \cdot 10^8 > 3,855 \cdot 10^8$. Отже, умова міцності виконується.

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 9.

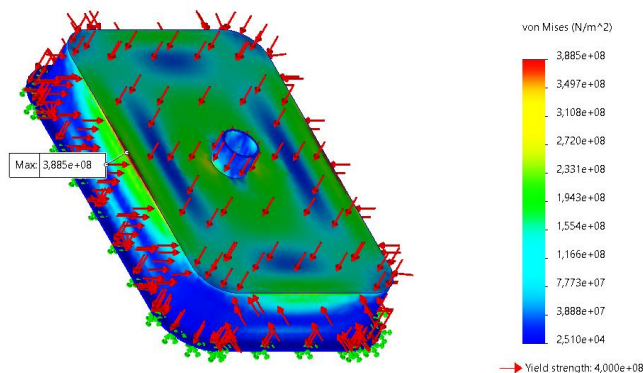


Рис. 8. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

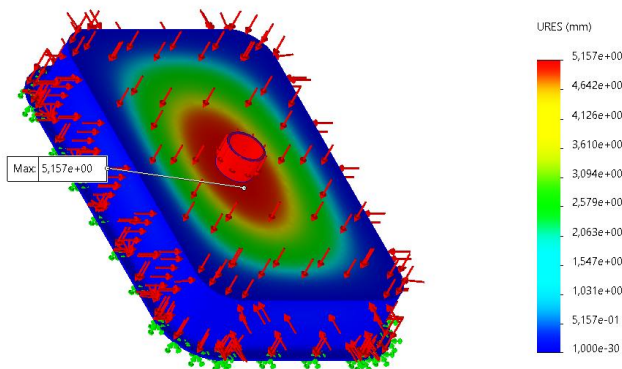


Рис. 9. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

У зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм, в результаті навантаження деформація складає 5,1 мм, отже, залишкова висота складає 84,9 мм. Висота батона 80 мм, отже, батон в процесі вакуумування не буде заминатися, але деформація на рівні 5,1 мм, що виникатиме за кожним циклом охолодження, негативно впливатиме на довговічність матеріалу, поступово знижуючи його експлуатаційні характеристики (рис. 9).

У результаті моделювання були визначені зони максимальних напруг і деформацій. Одним із шляхів усунення концентрації напруг і деформацій, а також збільшення жорсткості конструкції та зменшення вільного об'єму вакуумної камери є наближення її будови до сферичної форми.

На рис. 10 зображено 3Д моделі вакуумної камер з радіусом заокруглення верхньої кромки 10, 20, 30, 40 та 50 мм.

У результаті перевірки вакуумних камер із заокругленням верхньої кромки на міцність (рис. 11—15) максимальне навантаження становить: радіус заокруглення 10 мм — $\sigma_{max} = 3,309 \cdot 10^8$ Па; радіус заокруглення 20 мм — $\sigma_{max} = 2,813 \cdot 10^8$ Па;

радіус заокруглення 30 мм — $\sigma_{max} = 2,64 \cdot 10^8$ Па; радіус заокруглення 40 мм — $\sigma_{max} = 2,366 \cdot 10^8$ Па; радіус заокруглення 50 мм — $\sigma_{max} = 2,099 \cdot 10^8$ Па. $\sigma_c \geq \sigma_{max}$ — $6 \cdot 10^9 > 3,309 \cdot 10^8 \dots 2,099 \cdot 10^8$ Па. Отже, умова міцності виконується в усіх варіантах конструкції.

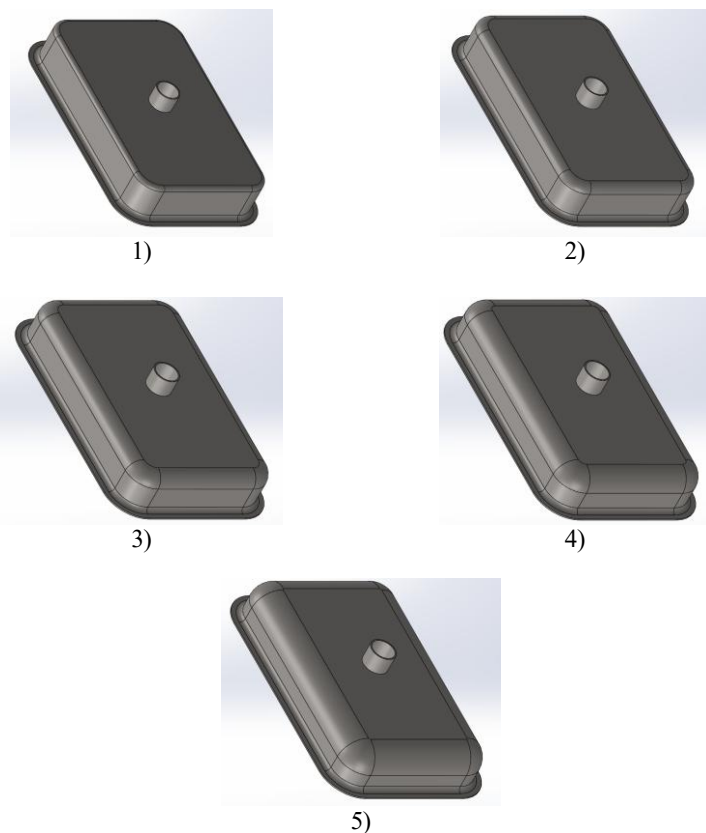


Рис. 10. 3Д моделі вакуумних камер із радіусом заокруглення верхньої кромки:
1 — 10 мм; 2 — 20 мм; 3 — 30 мм; 4 — 40 мм; 5 — 50 мм

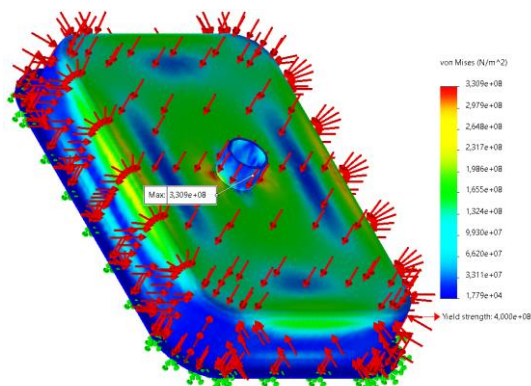


Рис. 11. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм

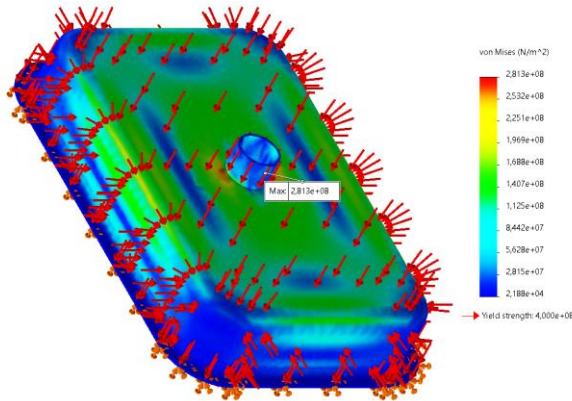


Рис. 12. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм

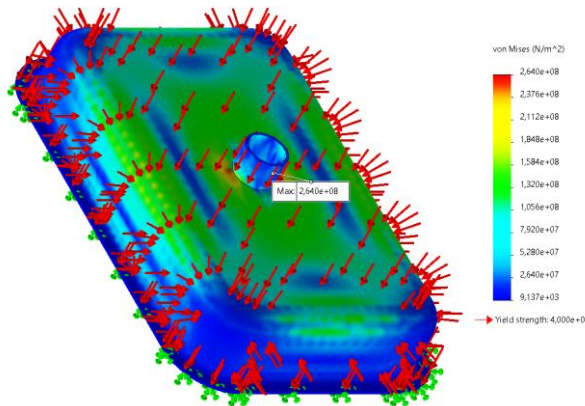


Рис. 13. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм

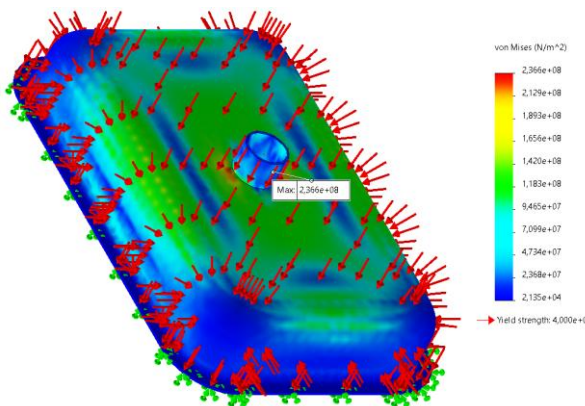


Рис. 14. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм

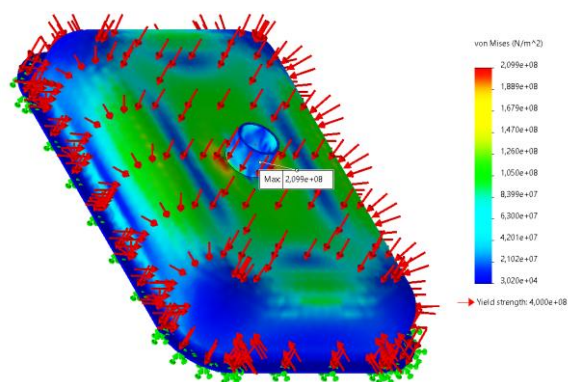


Рис. 15. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм

У результаті перевірки вакуумних камер із заокругленням верхньої кромки на деформацію (рис. 16—20) максимальне значення становить: радіус заокруглення 10 мм деформація — 4,8 мм; радіус заокруглення 20 мм деформація — 3,58 мм; радіус заокруглення 30 мм деформація — 3,091 мм; радіус заокруглення 40 мм деформація — 2,53 мм; радіус заокруглення 50 мм деформація — 2,07 мм.

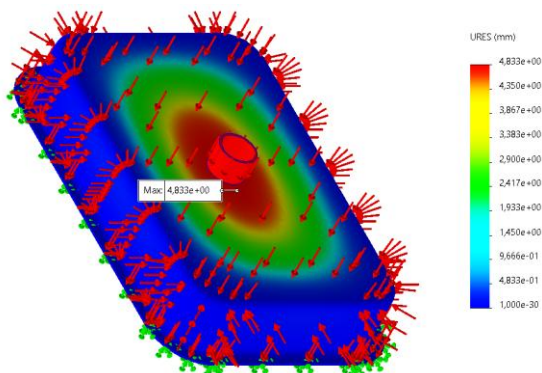


Рис. 16. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм

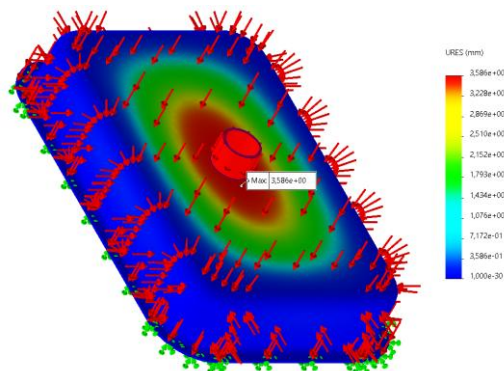


Рис. 17. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм

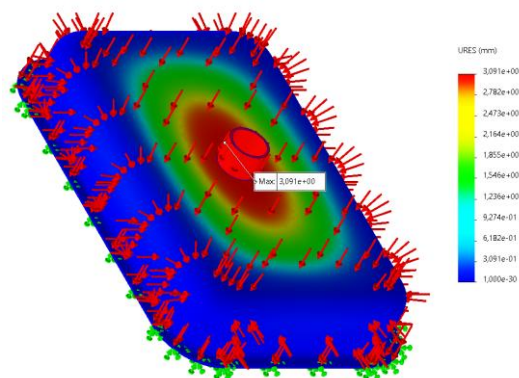


Рис. 18. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм

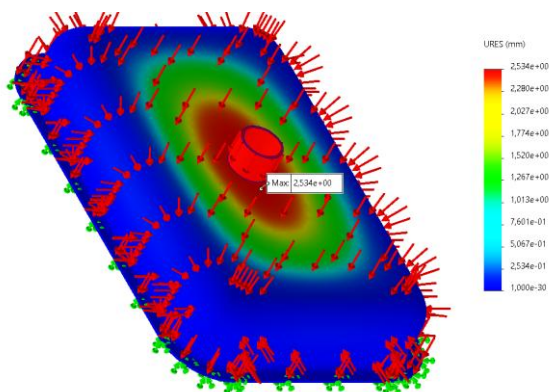


Рис. 19. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм

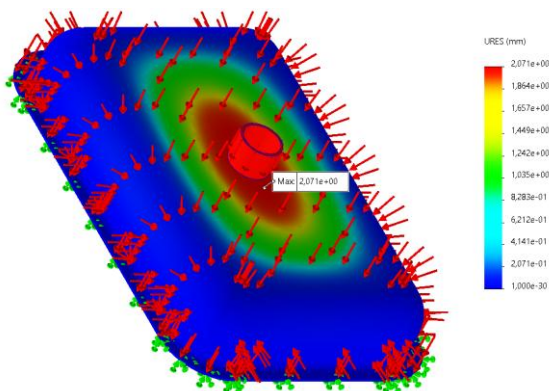


Рис. 20. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм

Заокруглення верхньої кромки вакуумної камери радіусом 50 мм дало змогу зменшити деформацію, що виникає в результаті зовнішнього тиску, з 5,1 мм до 2,07 мм.

Подальше збільшення радіусу заокруглення є недоцільним, оскільки це збільшує ризик пошкодження продукту всередині.

У зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм. У результаті моделювання деформація становить 2,07 мм, тому залишкова висота камери дорівнює 87 мм. Оскільки висота батона складає 80 мм, батон під час вакуумування не буде заминатися. При такій конструкції деформація є мінімальною, отже, будова вакуумної камери задовольняє умови експлуатації.

Висновки. 1. У ході дослідження визначено оптимальні конструктивні параметри ущільнення та вакуумної камери, які забезпечують ефективну роботу та довговічність апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів.

2. Розрахунки показали, що площа контакту ущільнення має становити 0,0389 м² для забезпечення герметичності. Як матеріал обрано гуму EPDM (50—60 Shore A), яка вирізняється пружністю, зносостійкістю та стійкістю до вакуумного середовища. Моделювання в SOLIDWORKS підтвердило, що ущільнення витримує навантаження без перевищення допустимих напружень.

3. Аналіз міцності вакуумної камери простої форми показав, що при вакуумуванні максимальне напруження становить $3,855 \cdot 10^8$ Па, що не перевищує допустиме для сталі AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2). Водночас деформація 5,1 мм є надмірною та може негативно впливати на довговічність конструкції й стабільність внутрішньої геометрії камери.

4. У результаті моделювання конструкцій з різними радіусами заокруглення верхньої кромки визначено, що оптимальним є радіус 50 мм. Це дає змогу зменшити деформацію до 2,07 мм, що покращує жорсткість конструкції, стабільність геометрії камери та рівномірність охолодження хлібобулочних виробів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ajani, C. K., Zhu, Z., Sun, D. W. (2022). In situ investigation of cellular water transport and morphological changes during vacuum cooling of steamed breads. *Food Chemistry*, 381. Article ID: 132211. ISSN 0308-8146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132211>.
2. Alibas, I., Koksall, N. (2015). Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis cv. Freemont): Part II. Determination of quality parameters during storage. *Food Science and Technology* (Campinas), 35(1), 45—50. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6457>.
3. Bahroni, S. A., Monteau, J. Y., Rezzoug, S. A., Loisel, C., Macce-Rezzoug, Z. (2014). Physics-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming processes of starchy material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 85, 216—226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.09.005>.
4. Burfoot, D., Hayden, R., Badran, R. (1989). *Simulation of a pressure cook/water and vacuum cooled processing system. Process Engineering in the Food Industry: Developments and Opportunities*. Eds. R. W. Field, J. A. Howell.
5. Cheng, H. P., Lin, C. T. (2007). The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 569—576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.025>.
6. Chhanwai, N., Tank, A., Raghavarao, K. S. M. S., Anandhamakrishnan, C. (2012). Computational fluid dynamics (CFD) modeling for bread baking process — a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1157—1172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0804-y>.
7. Demarchi, S. M., Irigoyen, R. M. T., Giner, S. A. (2018). Vacuum drying of rosehip leathers: Modeling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering*, 233, 9—16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.027>.
8. Erdogdu, F., Balaban, M. O., Chau, K. V. (1998). Modeling of heat conduction in elliptical cross section: I. Development and testing of the model. *Journal of Food Engineering*, 38(2), 223—239. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00100-9).

9. Everington, D. W. (1993). Vacuum technology for food processing. *Food Technology International Europe*, 71—74.
10. Gao, J., Wang, Y., Dong, Z., Zhou, W. (2018). Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 858—872. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.
11. Hy, Z., Sun, D. W. (2000). CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process. *Journal of Food Engineering*, 46(3), 189—197. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00082-0).
12. Huang, Z., Kan, A., Lu, J., Li, F., Wang, T. (2021). Numerical simulation and experimental study of heat and mass transfer in cylinder-like vegetables during vacuum cooling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 68, Article 102607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102607>.
13. Kozak, O., Telychkun, V. (2024). Mathematical model of vacuum cooling process for wheat bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(4), 780—793. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-4-11>.
14. Козак, О. С., Теличкун, В. І. (2023). Визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона в процесі вакуумного охолодження. *Харчова промисловість*, 33—34, 62—70. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2023-33-34-9>.
15. Козак, О. С., Теличкун, Ю. С., Теличкун, В. І. (2024). Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. *Наукові праці ВУХТ*, 30(4), 99—108. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-4-9>.